

0- 776960

На правах рукописи



Прудасв Илья Анатольевич

**ДИФФУЗИОННЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ  
АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО Fe и Cr**

01.04.10 – физика полупроводников

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2009

Работа выполнена на кафедре полупроводниковой электроники ГОУ ВПО «Томский государственный университет» и в лаборатории физики полупроводников ОСП «Сибирский физико-технический институт Томского государственного университета»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Хлудков Станислав Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Вилисов Анатолий Александрович

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Коханенко Андрей Павлович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский государственный  
университет систем управления  
и радиоэлектроники»

Защита диссертации состоится 4 июня 2009 г. в 14.30 на заседании диссертационного совета Д 212.267.07 в ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34 а

Автореферат разослан «29» апреля 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000547486

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д.ф.-м.н., профессор

И. В. Ивонин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Вся современная элементная база микроэлектроники построена на основе полупроводников, легированных «мелкими» примесями. В последние 10-15 лет в Томском госуниверситете активно развивается элементная база функциональной электроники, в основе которой лежат технологии легирования примесями с глубокими уровнями и создание многослойных полупроводниковых структур. Многослойные структуры на основе арсенида галлия, легированного примесями хрома или железа (GaAs:Cr,Fe), успешно используются для изготовления целого ряда приборов. Среди них основными являются импульсные лавинные S-диоды, фотоприемники ультрафиолетового диапазона, детекторы заряженных высокоэнергетических частиц, рентгеновского и гамма-излучений. По совокупности основных параметров данные приборы не уступают ближайшим аналогам.

Диффузия Cr и Fe в *n*-GaAs как способ изготовления компенсированных структур используется более 30 лет. Она удобна технологической простотой и малыми финансовыми затратами по сравнению с эпитаксиальными методами. Однако, в диффузионной технологии компенсированных структур имеется ряд нерешенных проблем. Одной из таких проблем является сложность получения компенсированных слоев толщиной более 1 мм для чего необходимы высокие температуры и большие времена диффузии, при которых возможна термомоконверсия материала. Другой проблемой является относительно невысокий процент выхода диффузионных S-диодов с требуемыми параметрами. Это связано с недостаточной изученностью влияния параметров диффузионных профилей на механизмы переключения и параметры S-диодов. Ранее при анализе результатов предполагалось, что при диффузии примесей Cr или Fe в GaAs формируется не плавный, а резкий *p-n*-переход. Такое упрощение позволило обосновать некоторые эмпирические зависимости и предложить технологические маршруты изготовления приборных структур, однако оно не является корректным, поскольку диффузионные электронно-дырочные переходы следует рассматривать как плавные. Кроме того, отсутствие надежных сведений о диффузионных параметрах электрически активных атомов Cr и Fe в GaAs не позволяло ранее описывать характеристики приборов с учетом точного распределения данных примесей. В частности, представленные в литературе данные по коэффициентам диффузии хрома в GaAs отличаются при одних и тех же температурах более чем на 3 порядка, что, очевидно, связано с различными условиями легирования. Данных о температурной зависимости растворимости электрически активных атомов Cr и Fe в GaAs в литературе не представлено.

Из вышеизложенного следует, что управление электрическими характеристиками приборных диффузионных структур требует тщательного исследования диффузионных процессов, лежащих в основе технологии их получения. Помимо получения фундаментальных данных по диффузии, такое исследование позволяет предложить новые пути управления характеристиками изготавливаемых приборов.

**Целью диссертационной работы** является установление закономерностей, связывающих электрофизические характеристики диффузионных GaAs:Cr и GaAs:Fe структур с электрическими параметрами приборов, изготовленных на их основе. Для достижения поставленной цели необходимо было **решить следующие задачи:**

1. Исследовать температурные зависимости растворимости и коэффициента диффузии Cr и Fe в GaAs, лежащие в основе технологии многослойных структур с примесями с глубокими уровнями.
2. Изготовить полупроводниковые структуры и приборные элементы с различными профилями распределения примесей Cr и Fe в GaAs в процессе диффузии.
3. Исследовать закономерности протекания тока в приборных структурах с глубокими центрами от типа и градиента распределения примеси, типа и параметров структур, задаваемых условиями диффузионного легирования.

**Объектом исследования** являлись многослойные структуры на основе GaAs, легированного в процессе диффузии примесями хрома (GaAs:Cr) и железа (GaAs:Fe), создающими глубокие энергетические уровни.

Экспериментальное определение профилей распределения, коэффициентов диффузии и растворимостей примесей осуществлялись методом *p-n*-перехода, методом двух образцов и аппроксимацией профилей функцией дополнения интеграла ошибок до единицы. Экспериментальные исследования статических и динамических вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились при помощи стандартных измерительных методик (статические характеристики измерялись в интервале температур от -10 до +75 °С, измерение обратной ВАХ после переключения проводили в импульсном режиме при комнатной температуре в схемах автогенератора и обострителя).

#### **Научная новизна**

1. Впервые определены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости Cr в GaAs при диффузии в открытой системе (в потоке инертного газа).
2. Впервые определена температурная зависимость растворимости электрически активных атомов Fe в GaAs при диффузии в запаянных ампулах при высоком давлении паров мышьяка ( $P \geq 1$  атм).





3. Получены новые экспериментальные данные о закономерностях протекания тока при обратном смещении лавинных S-диодов в зависимости от толщины базы ( $\pi$ -слоя) и влиянии инжекции неравновесных электронов с тылового контакта к  $\pi$ -слою на статические характеристики лавинных S-диодов.
4. Предложен новый тип многослойной полупроводниковой структуры и способ её изготовления в процессе двойной диффузии Cr и Fe в  $n$ -GaAs, позволяющие создать высоковольтные лавинные S-диоды; исследованы температурные зависимости ВАХ высоковольтных структур.

#### **Практическая значимость**

Результаты исследования температурных зависимостей коэффициента диффузии и растворимости примеси Cr в GaAs в открытой системе используются в серийном производстве полупроводниковых структур для многоэлементных детекторов ионизирующего излучения с максимальной толщиной активной области (до 1 мм и более).

Результаты исследования температурных зависимостей коэффициента диффузии и растворимости примеси Fe в GaAs в запаянных ампулах использованы при получении лабораторных образцов S-диодов с улучшенными характеристиками и могут быть использованы при разработке технологии изготовления промышленных образцов импульсных лавинных S-диодов.

Предложенные и исследованные в работе многослойные структуры  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}$ - $n$ -типа использовались для изготовления лабораторных образцов лавинных S-диодов с повышенным значением напряжения переключения (до 650 В).

Практическая значимость работы подтверждается выполнением следующих научно-исследовательских программ, в рамках которых проводилась диссертационная работа: межотраслевая научно-техническая программа сотрудничества Министерства образования Российской Федерации и Министерства Российской Федерации по атомной энергии по направлению «Научно-инновационное сотрудничество» (2005 г.); ведомственная научная программа «Развитие научного потенциала высшей школы», подпрограмма 2: «Прикладные исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники» (2005 г.); федеральная целевая научно-техническая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002-2006 годы» по приоритетному направлению «Развитие инфраструктуры» (2006 г.); программа «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», проводимая Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям и Федерального агентства по образованию (2007, 2008 гг.).

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Диффузия хрома в GaAs для открытой системы протекает по диссоциативному механизму; образование повышенной концентрации вакансий мышьяка обуславливает более высокий коэффициент диффузии хрома в GaAs для открытой системы в сравнении с закрытой при одинаковых температурах диффузии.
2. Переключение лавинных S-диодов, полученных диффузией Fe и Cr в *n*-GaAs, в проводящее состояние осуществляется в условиях развитого лавинного пробоя  $\pi$ -*v*-перехода по микроплазмам и инициируется неравновесными электронами, инжектированными из прямосмещенного контакта к  $\pi$ -слою; это обуславливает слабую зависимость напряжения переключения и существенное уменьшение силы тока переключения с уменьшением толщины базы.
3. Управляемое понижение сопротивления части  $\pi$ -области вблизи контакта приводит к усилению лавинных процессов в области объемного заряда  $\pi$ -*v*-перехода вследствие перераспределения напряженности электрического поля в GaAs:Cr структуре; это обуславливает снижение инжекции с прямосмещенного контакта в высокоомную  $\pi$ -область, что обеспечивает увеличение напряжения переключения S-диодов.

### **Апробация результатов**

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на международной конференции «Современные проблемы физики и высокие технологии» (г. Томск, 2003), на 4-ой и 6-ой Школах-семинарах молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития» (г. Томск, 2003, 2005 гг.), на 9-ой и 10-ой Российских научных студенческих конференциях «Физика твердого тела» (г. Томск 2004, 2006), на международных конференциях «SIBCON» (IEEE International Siberian conference on control and communication, Tomsk, 2005, 2007, 2009), на 9-ой Международной конференции «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» (г. Томск, 2006), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (г. Томск, 2008).

**Публикации** Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, 7 из которых – в изданиях, включенных в список ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Текст диссертации состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и приложения; содержит 87 рисунков, 9 таблиц, библиографический список из 121 наименования – всего 194 страницы.

### **Личный вклад автора**

Диссертационная работа является результатом исследований автора, проводившихся совместно с сотрудниками НОЦ «Физика и электроника сложных

полупроводников» ОСП «СФТИ ТГУ». Автором совместно с научным руководителем обсуждались цели работы, пути их достижения и полученные результаты. Личный вклад автора включает выбор методов решения задач, изготовление образцов и измерение их характеристик, проведение расчетов и анализ полученных данных.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение.** Во введении обосновывается актуальность, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены научные положения, выносимые на защиту, приводится краткая информация о структуре диссертации, публикациях и личном вкладе автора в научную работу.

**Первая глава.** В первой главе приводится обзор литературных данных по получению диффузионных структур на основе GaAs, компенсированного Cr или Fe, и исследованию их свойств. Тематически глава разбита на три части. Первая часть посвящена исследованию процесса диффузии примесей Cr и Fe в GaAs. Во второй части представлен обзор литературных данных по исследованию свойств электронно-дырочных переходов, образованных диффузией Fe и Cr в *n*-GaAs. В третьей части приводится краткий обзор приборов, изготовленных ранее на основе различных структур из GaAs, легированного Fe и Cr в процессе диффузии.

Анализ литературных данных показал, что механизм свободной диффузии атомов хрома и железа в GaAs – диссоциативный, а профиль распределения в объеме кристалла описывается функцией дополнения интеграла ошибок до единицы. При этом в литературе имеется большой разброс экспериментальных данных по коэффициентам диффузии (до пяти порядков), что является следствием различия условий экспериментов (диффузию проводили при разных давлениях паров мышьяка, через пленку SiO<sub>2</sub>, из напыленного металлического слоя или из навески). Сведений о температурных зависимостях растворимостей электрически активных атомов Cr или Fe в GaAs на начало работы в литературе не было. Также в литературе не было обнаружено данных об исследовании диффузии рассматриваемых примесей в открытых системах (в потоке инертных или восстановительных газов).

Электронно-дырочные переходы (*p-v-n*-структуры), образованные диффузией примесей Cr или Fe в *n*-GaAs, обладают специфическими свойствами, что позволяет изготавливать на их основе ряд оригинальных приборов: лавинные импульсные *S*-диоды и детекторы широкого спектрального диапазона электромагнитного излучения.

Прямая статическая ВАХ диодов на основе *p-v-n*-структур, легированных Fe или Cr в процессе диффузии, состоит из двух участков. Первый описывается генерационно-рекомбинационной теорией Саа-Нойса-Шокли. Для диодов,

полученных диффузией Fe, на прямой ветви может наблюдаться также туннельная составляющая тока с участием глубокого уровня. На втором участке прямая ВАХ описывается теорией Стафеева для высокого уровня инжекции. Для части диодов после второго участка может следовать участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС). Обратная статическая ВАХ диффузионных диодов состоит из трех участков. Первый описывается генерационно-рекомбинационной теорией Саа-Нойса-Шокли. Второй (наиболее характерный для структур, легированных хромом) обусловлен эффектом Пула-Френкеля. Третий участок обусловлен лавинным микроплазменным пробоем диода. Экспериментально установлено, что участок ОДС субнаносекундного быстрого действия, следующий за участком микроплазменного пробоя, имеет место только при наличии инжектирующего контакта к  $n$ -области.

Для диодов на основе диффузионных  $p$ - $n$ -структур основными параметрами, влияющими на характеристики приборов, являются толщина базы (высокоомного слоя) и концентрация доноров в  $n$ -слое. Зависимость напряжения переключения от толщины базы объясняется падением напряжения на сопротивлении растекания микроплазмы. Однако, до сих пор для диффузионных структур точно не было установлено, как влияет изменение толщины базы на вид ВАХ. Влияние концентрации доноров в  $n$ -слое на напряжение переключения объясняют зависимостью напряжения пробоя  $p$ - $n$ -перехода от разностной концентрации доноров и акцепторов в области объемного заряда. Такая трактовка изначально предполагает, что в процессе диффузии формируется резкий переход, однако, методологически, диффузионные переходы следует исследовать как плавные.

В заключение первой главы сформулированы цели и задачи исследования, вытекающие из анализа литературных данных.

**Вторая глава.** Вторая глава является методической. В ней подробно излагаются методики исследования и способы изготовления экспериментальных образцов.

Способы диффузии можно разделить на диффузию в потоке инертного (или восстановительного) газа и диффузию в запаянных ампулах. В данной работе с использованием первого способа исследовалась только диффузия хрома в GaAs, что продиктовано практической важностью этого метода для получения приборных детекторных структур. С другой стороны, второй способ предпочтителен для получения  $S$ -диодных структур и, поэтому, при его помощи исследовалась как диффузия хрома, так и диффузия железа.

Полученные в процессе диффузии структуры использовались для изготовления лавинных  $S$ -диодов с целью дальнейшего исследования их статических и импульсных ВАХ. В работе исследовались ВАХ трех видов

приборных структур: 1 – дискретные диоды со сплавными контактами на основе структур  $\pi$ - $v$ - $n$ -типа (либо  $\pi^{Fe}$ - $\pi^{Cr}$ - $v^{Cr}$ - $n$ -типа); 2 – матрицы диодов, изготовленные по меза-планарной технологии, на основе структур  $n$ - $\pi$ - $v$ - $n$ -типа; 3 – линейки диодов со сплавными контактами на основе структур  $\pi$ - $v$ - $n$ -типа. Изготовление каждого из перечисленных видов приборных структур позволило решить конкретные научно-практические задачи и привело к созданию новых исследовательских методик, представленных в работе.

**Третья глава.** В третьей главе излагаются результаты исследования диффузии Cr и Fe в GaAs. Диффузия Cr в GaAs в открытой системе (в потоке инертного газа) изучена впервые. Получены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости электрически активных атомов Cr в GaAs, которые описываются зависимостями Аррениуса ( $T = 900 - 1000^\circ \text{C}$ ):

$$D_{Cr} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{k \cdot T}\right), \quad N_{Cr} = N_{Cr}^0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_{Cr}}{k \cdot T}\right), \quad (1)$$

где  $D_0 = 1.7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $Q = 1.4 \pm 0.1 \text{ эВ}$ ;  $N_{Cr}^0 = 8.9 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ ,  $Q_{Cr} = 1.2 \pm 0.1 \text{ эВ}$ .

Анализ полученных результатов показал, что диффузия хрома в GaAs в потоке инертного газа протекает аналогично диффузии при условии низкого (равновесного) давления паров мышьяка в вакуумированных ампулах, что объяснимо с позиций диссоциативного механизма диффузии. При диссоциативном механизме коэффициент диффузии и растворимость примеси определяются, прежде всего, концентрацией вакансий, которая может регулироваться давлением паров мышьяка. Коэффициент диффузии при этом обратно пропорционален концентрации вакансий галлия, в которые встраиваются диффундирующие атомы хрома. Так как произведение равновесных концентраций вакансий обших подрешеток остается величиной постоянной, то понижение давления паров мышьяка приводит к увеличению коэффициента диффузии атомов хрома. При диффузии в открытой системе происходит обеднение арсенида галлия мышьяком из-за его частичного испарения в атмосферу аргона, а также из-за его растворения в защитной пленке  $\text{SiO}_2$ . Это и приводит к увеличению эффективного коэффициента диффузии хрома по сравнению со случаем диффузии в ампулах с избыточным давлением паров мышьяка.

В третьей главе также приводятся результаты исследования диффузии электрически активных атомов железа в GaAs при высоком давлении паров мышьяка ( $P = 1 \text{ атм}$ ). Температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости электрически активных атомов Fe в GaAs описываются следующими выражениями ( $T = 900 - 1150^\circ \text{C}$ ):

$$D_{Fe} = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_0}{k \cdot T}\right), \quad N_{Fe} = N_{Fe}^0 \cdot \exp\left(-\frac{Q_{Fe}}{k \cdot T}\right), \quad (2)$$

где  $D_0 = 1.6 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $Q_0 = 2.2 \pm 0.5 \text{ эВ}$ ;  $N_{Fe}^0 = 4.7 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ,  $Q_{Fe} = 1.6 \pm 0.2 \text{ эВ}$ .

Полученные зависимости (1) и (2) использовались при изготовлении структур с заданными параметрами с целью дальнейшего исследования их электрических характеристик.

**Четвертая глава.** В четвертой главе приводятся результаты исследования электрических характеристик структур, полученных диффузией глубоких акцепторных примесей в  $n$ -GaAs. Рассматривается влияние толщины высокоомного слоя ( $d_x$ ) и градиента концентрации ( $a_x$ ) примеси в области  $\pi$ - $v$ -перехода на напряжение переключения ( $U_n$ ), ток переключения ( $I_n$ ) и ВАХ (в целом)  $S$ -диодов. Проводится сравнительное исследование ВАХ структур, полученных диффузией Fe, Cr, и одновременно Fe и Cr в  $n$ -GaAs.

Полученные экспериментальные данные интерпретируются с учетом неоднородного профиля распределения глубокого акцептора в  $n$ -GaAs. С использованием результатов, представленных в третьей главе, была установлена связь параметров профилей примесей в структурах с электрическими характеристиками приборов, изготовленных на их основе.

Было установлено, что напряжение переключения диффузионных структур на основе GaAs:Fe зависит от градиента концентрации примеси в области объемного заряда (ООЗ). Анализ всей совокупности литературных данных и данных, полученных в настоящей работе, показал, что для сопоставления напряжений переключения с градиентом концентрации примеси в ООЗ необходимо проводить сравнение величин  $U_n$  для разных партий диодов при одинаковых токах переключения. Это связано с тем, что напряжение пробоя всегда больше  $U_n$ , так как переключение структуры происходит в области микроплазменного пробоя. Таким образом, экспериментальная зависимость  $U_n$  от градиента концентрации для диодов с одинаковыми  $I_n$  лежит ниже кривой, отражающей зависимость напряжения пробоя от  $a_x$  и проходит параллельно ей, как показано на рисунке 1. Исключением является точка для  $a_x = 2.6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-4}$ , полученная для диодов с наименьшей толщиной базы  $d_x = 8 \text{ мкм}$ , при которой механизм переключения меняется.

Для исследования влияния толщины базы  $S$ -диода на обратную ВАХ была разработана методика послойного снятия высокоомного слоя отдельно взятых  $S$ -диодов. Интерпретировать экспериментальные данные при использовании такой

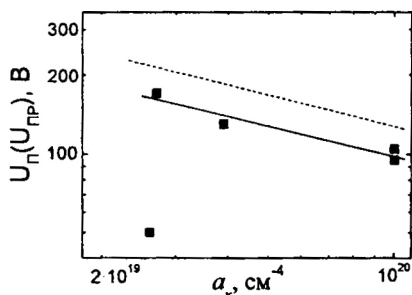


Рис. 1. Зависимость напряжения переключения при  $I_n = 1 \text{ мкА}$  от градиента концентрации; пунктирной линией показана теоретическая зависимость для напряжения пробоя

методики проще, так как в ходе опыта изменялся всего лишь один параметр – толщина базы. Структура и геометрические параметры единичного S-диода при этом оставались постоянными. Ранее при таких исследованиях изменения толщины добивались изменением температуры и времени диффузии, что влияло на градиент концентрации в области  $\pi$ - $v$ -перехода. Экспериментальные образцы  $\pi$ - $v$ - $n$ -структур получали диффузией Fe в  $n$ -GaAs.

На рисунке 2 представлены наиболее типичные обратные ВАХ S-диодов с разными толщинами базы в области сильных полей. Как видно из рисунка 2, наблюдается некоторое уменьшение напряжения переключения и существенное снижение тока переключения по мере уменьшения толщины высокоомного слоя. При уменьшении толщины до минимального значения в некоторых случаях наблюдается искажение вольт-амперной характеристики (рис. 2 б при толщине базы 12 мкм), что свидетельствует об изменении механизма переключения диода.

В работе предложен механизм влияния  $d_x$  на  $U_n$  и  $I_n$ , связанный с инжекцией электронов с прямосмещенного контакта к  $\pi$ -слою. Мы предположили, что эквивалентную схему S-диода при обратном смещении можно представить как последовательное включение ООЗ  $\pi$ - $v$ -перехода, сопротивления толщи базы ( $\pi$ -слоя) и  $M$ - $\pi$ -перехода (или  $n$ - $\pi$ -перехода – в зависимости от типа используемого контакта). При подаче на диод обратного смещения для  $\pi$ - $v$ -перехода вначале все напряжение падает на нем, но когда начинается микроплазменный пробой, сопротивление  $\pi$ - $v$ -перехода резко уменьшается и часть подаваемого напряжения будет падать на последовательно включенных сопротивлениях толщи  $\pi$ -слоя и прямосмещенном  $M$ - $\pi$ -переходе. Электроны, инжектированные с прямосмещенного  $M$ - $\pi$ -перехода, будут перемещаться в  $\pi$ -области. Некоторая их часть (не прорекомбинировавшая с дырками) дойдет до области сильного поля  $\pi$ - $v$ -перехода, что приведет к ударной ионизации с последующей перезарядкой глубоких центров.

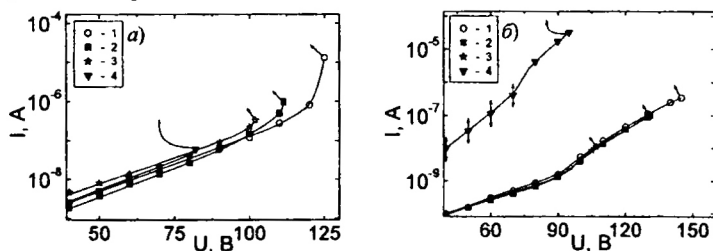


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов при различных толщинах базы: а – для структуры №1, толщина удаленного слоя: 1 – 0 мкм; 2 – 15 мкм; 3 – 24 мкм; 4 – 36 мкм (начальная толщина 46 мкм); б – для структуры №2, толщина убранного слоя: 1 – 0 мкм; 2 – 33 мкм; 3 – 52 мкм; 4 – 65 мкм (начальная толщина 77 мкм); стрелками указано начало участка ОДС

В предположении, что инжектированные электроны переносятся в базе за счет дрейфа, а концентрация носителей заряда, дошедших до ООЗ, остается постоянной величиной для всех толщин  $d_\pi$ , были получены следующие выражения для напряжения и тока переключения:

$$U_{\pi} = \frac{1}{\gamma} \cdot \ln \left[ \frac{d_\pi^2}{\tau_n \cdot \mu_n \cdot G \cdot I_0 \cdot R_\pi} \right], \quad I_{\pi} = \frac{d_\pi^2}{\tau_n \cdot \mu_n \cdot G \cdot R_\pi}, \quad (3)$$

где  $\tau_n, \mu_n$  – время жизни и подвижность электронов в  $\pi$ -слое;  $\gamma, I_0$  – величины, характеризующие микроплазменный пробой, которые определяются из вида обратной ВАХ;  $R_\pi$  – сопротивление  $\pi$ -слоя, которое в общем случае зависит от  $d_\pi$ ;  $G$  – подгоночный параметр, характеризующий относительную часть электронов, дошедших от инжектирующего контакта до ООЗ.

На рисунке 3 представлены расчетная и экспериментальные зависимости напряжения переключения от толщины базы. Имеет место совпадение экспериментальных и расчетных значений. Для расчета использовались следующие величины:  $\gamma = 7 \cdot 10^{-2} \text{ В}^{-1}$ ;  $\tau_n = 10^{-9} \text{ с}$ ;  $\mu_n = 1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $I_0 = 10^{-9} \text{ А}$ ;  $R_\pi = 10^7 \text{ Ом}$ ;  $G = 0.23$ .

Исследование ВАХ структур на основе GaAs:Cr показало, что прямая ветвь ВАХ (рис. 4 а) в интервале температур от  $-10$  до  $+75^\circ \text{C}$  хорошо описывается в рамках теории Стафеева. Обобщить результаты измерений для обратных ВАХ структур из GaAs:Cr удастся только для напряжений  $U < 1-10 \text{ В}$ . Это обусловлено тем, что при  $U > 1-10 \text{ В}$  для данных диодов характерен гистерезис ВАХ, а также имеют место колебания тока при фиксированных напряжениях. При напряжениях  $U > 80-120 \text{ В}$  помимо колебаний тока появляются колебания напряжения. При максимальных подаваемых напряжениях  $U = 100-200 \text{ В}$  амплитуды колебаний тока и напряжения резко усиливаются и диоды переключаются в состояние с большим остаточным напряжением (не менее 50% от напряжения переключения) и малым током в открытом состоянии (не более 1-2 мА). Однако, в большинстве случаев переключение происходит необратимо.

Общими для всех диодов на основе GaAs:Cr являются два начальных участка обратной ВАХ: 1 – участок линейной зависимости тока от напряжения до  $U \approx 0.1-1 \text{ В}$ ; 2 – сублинейный участок до  $U \approx 1-10 \text{ В}$  (рис. 4 б). Зависимость тока от  $1/T$  на втором участке носит экспоненциальный характер с энергией активации  $E \approx 0,75 \text{ эВ}$ .

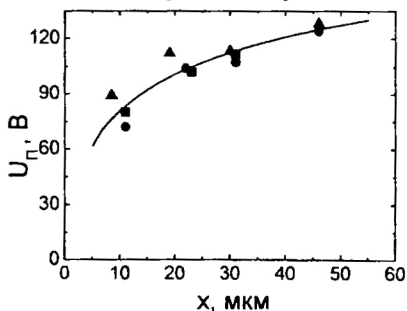


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная зависимости напряжения переключения от толщины базы для трех различных диодов (структура №1)



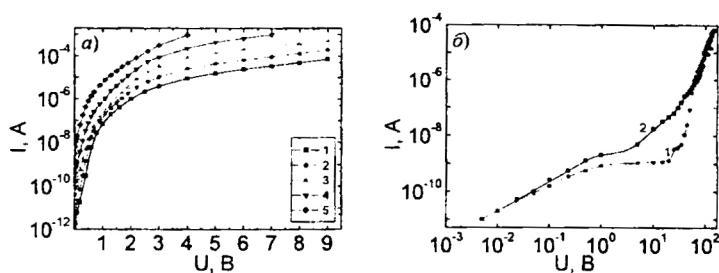


Рис. 4. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ для  $\pi$ - $v$ - $n$ -структур, полученных диффузией хрома в GaAs.  $T_{\text{диф}} = 970^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{As}} = 1 \text{ атм.}$ ,  $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $d_{\text{нос}} = 20\text{-}30 \text{ мкм}$ ; а: 1 –  $T = 264 \text{ K}$ , 2 –  $T = 278 \text{ K}$ , 3 –  $T = 295 \text{ K}$ , 4 –  $T = 316 \text{ K}$ , 5 –  $T = 349 \text{ K}$ ; б: 1 – напряжение увеличивается, 2 – напряжение снижается

Анализ показал, что отсутствие участка ОДС при обратном смещении для большей части  $\pi$ - $v$ - $n$ -структур, полученных диффузией Cr в GaAs, объясняется падением большей части приложенного напряжения на высокоомной  $\pi$ -области. Это является причиной отсутствия в ООЗ той напряженности поля, при которой достигается критическая плотность тока, инициирующая лавинный микроплазменный пробой с захватом носителей заряда на глубокие уровни. При этом резкий рост тока в большей степени обусловлен инжекцией электронов с прямосмещенного контакта к  $\pi$ -слою.

Для снижения влияния инжекции из контакта в базу при обратном смещении  $\pi$ - $v$ -перехода было предложено понизить сопротивление части  $\pi$ -слоя. Это, с одной стороны, привело к ограничению распространения поля в базу, а с другой, повысило барьер для инжекции неосновных носителей. В этом случае, пока сопротивление  $\pi$ - $v$ -перехода много больше сопротивления низкоомной части базы, протекающий ток обусловлен процессами в ООЗ и прилегающей к ней высокоомной части  $\pi$ -области. При достижении критического значения напряженности поля в ООЗ электроны, инжектированные с контакта, инициируют переключение структуры, по механизму, рассмотренному для диодов на основе GaAs:Fe.

В процессе изготовления структур понизить сопротивление базы удалось путем дополнительного введения в GaAs:Cr более мелкого акцептора. В данной работе было предложено использовать в качестве такого акцептора Fe. Полученную двойным легированием структуру условно можно обозначать как структуру  $\pi^{\text{Fe}}\text{-}\pi^{\text{Cr}}\text{-}v^{\text{Cr}}\text{-}n$ -типа.

При изготовлении структур  $\pi^{\text{Fe}}\text{-}\pi^{\text{Cr}}\text{-}v^{\text{Cr}}\text{-}n$ -типа создавался такой профиль легирования, в котором приповерхностная область  $\pi$ -типа была образована

примесью железа и хрома, а  $\pi$ - $v$ -переход был создан в основном примесью хрома. Этого добивались последовательной диффузией сначала хрома, а потом железа в одну и ту же пластину  $n$ -GaAs при разных условиях. Распределения примесей Fe и Cr в структуре представлены на рисунке 5. Положения  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}$ - и  $\pi^{Cr}-v^{Cr}$ -переходов задаются точками пересечения профиля железа и суммарного профиля Fe и Cr с профилем исходного мелкого донора соответственно. При этом в равновесии между  $\pi^{Fe}$ - и  $\pi^{Cr}$ -областями имеет место барьер с энергией около 0.2 эВ, а в области электронно-дырочного перехода – барьер с энергией около 0.75 эВ. Из данных структур были изготовлены лавинные S-диоды, измерены их статические и динамические ВАХ.

В результате исследования выяснилось, что прямая ветвь ВАХ диодов на основе  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}$ - $n$ -структуры (рис. 6 а), так же как и для диодов из GaAs:Cr, описывается в рамках теории Стафсева, обратная же ВАХ существенно отличается.

На рисунке 6 б представлены типичные обратные ВАХ структур  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}$ - $n$ -типа при различных температурах до переключения. Всего наблюдается 4 основных участка на статической ВАХ. Первый, линейный, имеет место до  $U \approx 0.02$  В. Второй участок, слабого роста тока с напряжением, наблюдается для напряжений  $0.02 \text{ В} < U < 30 \text{ В}$ :  $I \sim U^m$ , где  $m < 1/5$ . Зависимость тока при фиксированном напряжении от температуры на втором участке хорошо спрямляется в координатах  $\ln(I)$  от  $1/T$  с энергией активации  $E \approx 0.84$  эВ. На третьем участке  $I \sim \exp(\alpha \cdot U^{1/4})$ , где  $\alpha$  зависит от температуры обратно пропорционально. На четвертом участке  $I \sim \exp(\gamma \cdot U)$ , где  $\gamma$  также является функцией от  $T$ . Четвертый участок завершается переключением с субнаносекундным быстродействием при напряжениях 250 – 450 В. После переключения следует участок резкого роста тока, близкий к вертикальному.

Анализ обратной ВАХ показал, что в протекании обратного тока  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}$ - $n$ -структур основную роль играют процессы, развивающиеся в ООЗ и прилегающей к ней  $\pi^{Cr}$ -области. На втором участке имеет место генерационная составляющая тока, которая на третьем участке усиливается термополевой ионизацией (за счет эффекта Пула-Френкеля). Четвертый участок

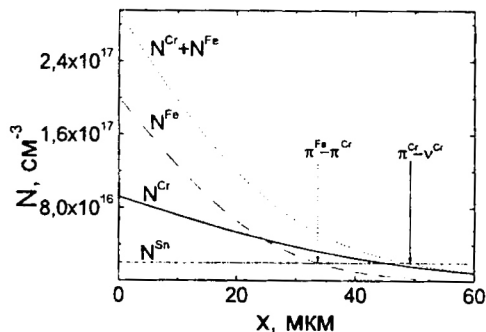


Рис. 5. Профили распределения примесей Fe и Cr для структур  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}$ - $n$ -типа:  $T^{Cr} = 970^\circ\text{C}$ ,  $t^{Cr} = 2$  ч,  $T^{Fe} = 1000^\circ\text{C}$ ,  $t^{Fe} = 7$  мин

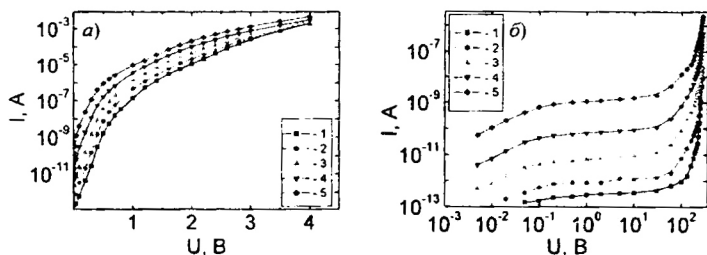


Рис. 6. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ для  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -структур, полученных диффузией хрома и железа в GaAs: 1 –  $T = 266$  K, 2 –  $T = 279$  K, 3 –  $T = 297$  K, 4 –  $T = 318$  K, 5 –  $T = 345$  K

соответствует микроплазменному пробое, который при максимальных подаваемых напряжениях инициирует перезарядку глубоких центров хрома в ООЗ, что приводит к быстрому переключению структуры в открытое состояние.

Также исследования показали, что напряжение переключения структур  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -типа может быть выше напряжения лавинного пробоя, развитого по всей площади  $\pi^{Cr}-v^{Cr}$ -перехода. Это связано с тем, что большая часть приложенного к  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -структуре напряжения в условиях микроплазменного пробоя падает на высокоомной  $\pi^{Cr}$ -области (в отличие от структур из GaAs:Fe).

**Пятая глава.** Пятая глава посвящена практическому применению результатов исследования диссертационной работы. Данные о диффузионных параметрах Fe и Cr в GaAs, изложенные в главе 3, а также результаты исследований электрических свойств диффузионных структур на основе GaAs, легированного Fe и Cr, представленные в главе 4, использовались для изготовления ряда полупроводниковых приборов: детекторов ионизирующего излучения, лавинных S-диодов и S-транзисторов. Кроме того, на основе проведенных исследований были предложены новые способы изготовления различных структур, позволяющие улучшить характеристики приборов на их основе. Основные результаты, изложенные в пятой главе, состоят в следующем.

1. Экспериментально полученные в работе температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости хрома в GaAs в протоке аргона были применены для оценки времени и температуры технологических отжигов при изготовлении резистивных структур большой толщины с оптимальными параметрами. Диффузия примеси Cr в GaAs в проточной системе позволила создать слои для детекторов ионизирующих излучений с удельным сопротивлением до  $10^9$  Ом·см и толщиной более 1 мм, что существенно увеличило эффективность регистрации гамма-квантов.

2. Предложен новый тип и способ изготовления S-диодных  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -структур. Он позволил увеличить напряжение переключения S-диодов до 650 В,

что в 3-5 раз выше максимальных напряжений переключения для традиционных  $\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -структур, полученных диффузией Fe. Данные диоды могут быть использованы в качестве ключевых элементов в высоковольтных формирователях наносекундных импульсов напряжения с амплитудой более 1000 В.

3. Предложен новый способ создания диффузионных структур  $p^+-\pi$ - $\nu$ - $\pi$ - и  $\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -типов методом геттерирования глубокого акцептора Fe из исходной GaAs-структуры  $\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -типа. Структуры могут применяться в качестве базовых для создания S-диодов и S-транзисторов. S-диоды на основе  $\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -структур, полученных геттерированием, должны обладать лучшим быстродействием по сравнению с диодами на основе диффузионных  $n^+-\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -структур и меньшими токами переключения. Предложенный способ позволит существенно упростить процесс изготовления S-транзисторов.

### Заключение

В работе проанализирована литература по диффузии хрома и железа в арсениде галлия, электрическим характеристикам и приборам на основе GaAs, легированного Fe и Cr. Проведены экспериментальные исследования диффузии примесей Fe и Cr в GaAs, изготовлены различные типы приборных структур на основе компенсированных слоев, исследованы их электрические характеристики. Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом.

1. Впервые изучена диффузия Cr в GaAs в открытой системе. Обнаружено, что свободная диффузия Cr в GaAs в интервале температур 900-1000 °С в открытой системе протекает подобно диффузии в вакуумированных ампулах без навески мышьяка, то есть сопровождается процессом частичного разложения GaAs, что приводит к увеличению эффективного коэффициента диффузии Cr.
2. Получены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости хрома в GaAs в открытой системе. Показано, что диффузия из напыленного слоя позволяет на порядок увеличить концентрацию хрома в GaAs по сравнению с диффузией из навески, что объясняется увеличением концентрации хрома в источнике диффузанта; в первом случае источником является смесь равновесных фаз тройного состава *Ga-As-Cr*, во втором – газовая фаза с низким давлением паров Cr.
3. Впервые экспериментально определены температурные зависимости коэффициента диффузии и растворимости электрически активных атомов Fe в GaAs при диффузии в запаянных ампулах и давлении паров мышьяка  $P = 1$  атм.
4. Показано, что процессы токопротекания в диффузионных  $\pi$ - $\nu$ - $\pi$ -структурах объясняются с позиций формирования линейного прехода; напряженне

- переключения S-диода из закрытого в проводящее состояние при фиксированных токах является функцией градиента концентрации примеси в области объемного заряда  $\pi$ - $v$ -перехода.
5. Форма обратных ветвей ВАХ S-диодов на основе GaAs:Fe слабо зависит от толщины базы  $\pi$ - $v$ - $n$ -структур ( $d_n$ ). Наблюдаемая закономерность напряжения переключения от  $d_n$  обусловлена инжекцией электронов из прямосмещенного контакта к  $\pi$ -слою. Снижение инжекции электронов из контакта к  $\pi$ -слою деформирует ВАХ вплоть до исчезновения S-характеристики на участке микроплазменного пробоя; напряжение и ток переключения значительно увеличиваются. Данный результат имеет важное практическое значение; удаление части нарушенного  $\pi$ -слоя толщиной 10-15 мкм обеспечивает формирование надёжного инжектирующего контакта в структурах из GaAs:Fe.
  6. Предложена оригинальная полупроводниковая структура  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -типа, полученная в процессе двойного легирования GaAs примесями Cr и Fe. Показано, что напряжение переключения S-диодов на основе  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -структур превышает напряжение лавинного пробоя  $\pi$ - $v$ -перехода GaAs:Cr структур. Это связано с тем, что большая часть приложенного к  $\pi^{Fe}-\pi^{Cr}-v^{Cr}-n$ -структуре напряжения в условиях микроплазменного пробоя  $\pi^{Cr}-v^{Cr}$ -перехода падает на высокоомной  $\pi^{Cr}$ -области и, таким образом, регулируется ее толщиной, в отличие от GaAs:Fe структур.
  7. На основе диффузионных структур, компенсированных глубокими акцепторными примесями, создан ряд полупроводниковых приборов нового типа: детекторы прямого счёта единичных заряженных частиц высоких энергий и квантов рентгеновского и гамма-излучений с высокой квантовой эффективностью; диоды импульсные лавинные (S-диоды) с напряжением переключения до 650 В.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Прудаев, И.А. Диффузия и растворимость хрома в арсениде галлия / И.А. Прудаев, М.В. Ардышев // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 28, № 6 – С. 46-47 (0,14 п.л).
2. Будницкий, Д.Л. Время жизни носителей заряда в высокоомном GaAs, легированном диффузией хрома / Д.Л. Будницкий, В.А. Новиков, О.П. Толбанов, И.А. Прудаев // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51, № 5. – С. 84-88 (0,41 п.л).
3. Ардышев, М.В. Диффузия хрома в GaAs в открытой системе / М.В. Ардышев, И.А. Прудаев, О.П. Толбанов, С.С. Хлудков // Неорг. материалы. – 2008. – Т. 44, № 9. – С. 1036-1040 (0,34 п.л).

4. Прудаев, И.А. Диффузия и растворимость электрически активного железа в арсениде галлия / И.А. Прудаев, С.С. Хлудков // Изв. вуз. Физика. – 2008. – № 11 – С. 48-51 (0,24 п.л).
5. Прудаев, И.А. Переключающие планарные S-диоды на основе арсенида галлия / И.А. Прудаев, М.С. Скакунов, О.П. Толбанов, С.С. Хлудков // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 9/3. – С. 32-33 (0,15 п.л).
6. Шабаш, А.В. Измерение зависимости времени задержки переключения S-диода от перенапряжения / А.В. Шабаш, Б.И. Авдоченко, И.А. Прудаев // Изв. вуз. Физика. – 2008. – Т. 51, № 9/3. – С. 44-45 (0,16 п.л).
7. Прудаев, И.А. Влияние толщины базы лавинного S-диода на его обратную вольт-амперную характеристику / И.А. Прудаев, С.С. Хлудков // Изв. вуз. Физика. – 2009. – № 2. – С. 48-53 (0,5 п.л).
8. Ардышев, М.В. Исследование диффузии хрома в арсенид галлия в открытой газовой системе / М.В. Ардышев, И.А. Прудаев // Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития : Сб. статей молодых ученых. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. – С. 65-67 (0,1 п.л).
9. Ардышев, М.В. Получение предельно высокоомного GaAs диффузией хрома в форми-газе / М.В. Ардышев, И.А. Прудаев // Современные проблемы физики и высоких технологий : Материалы международной конференции – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2003. – С. 154-156 (0,12 п.л).
10. Прудаев, И.А. Исследование диффузии хрома в арсенид галлия в потоке водорода / И.А. Прудаев, М.В. Ардышев // Физика твердого тела : Сборник материалов IX Российской научной студенческой конференции. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2004. – С. 91-92 (0,11 п.л).
11. Ardyshev, M.V. Diffusion of chromium into GaAs as a way to detector material making / M.V. Ardyshev, I.A. Prudaev, S.S. Khludkov // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2005). Proceedings. – Tomsk : The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, 2005. – P. 68-71 (0,13 p.s).
12. Хлудков, С.С. Диффузия хрома в GaAs при низком давлении паров мышьяка / С.С. Хлудков, О.Б. Корещкая, И.А. Прудаев, Г.Р. Бурнашева // Девятая конференция «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V» : Материалы международной конференции. – Томск : Томский госуниверситет, 2006. – С. 108-111 (0,19 п.л).
13. Скакунов, М.С. Оптоэлектронный ключ с субнаносекундным быстродействием / М.С. Скакунов, И.А. Прудаев // Физика твердого тела : Сборник материалов X Российской научной студенческой конференции. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. – С. 250-252 (0,1 п.л).
14. Прудаев, И.А. S-диод с управляющим электродом / И.А. Прудаев, М.С. Скакунов, О.П. Толбанов // Девятая конференция «Арсенид галлия и

полупроводниковые соединения группы III-V» : Материалы международной конференции. – Томск : Томский госуниверситет, 2006. – С. 431-434 (0,14 п.л).

15. Prudaev, I.A. Subnanosecond optoelectronic switch / I.A. Prudaev, M.S. Skakunov, O.P. Tolbanov // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2007). Proceedings. – Tomsk : The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, 2007. – P. 228-230 (0,1 p.s).
16. Prudaev, I.A. Transformation of current-voltage characteristics of GaAs  $\pi$ - $v$ - $n$ -structures under modification of  $\pi$ -layer resistance / I.A. Prudaev, M.S. Skakunov, S.S. Khludkov // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2009). Proceedings. – Tomsk : The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch. Russia, Tomsk, 2009. – P. 180-184 (0,14 p.s).

10-

Тираж 100 экз.  
Отпечатано в КЦ «Позитив»  
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а